

Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizi- coles du Delta du Fleuve Sénégal Modelling water and salt transfer in rice plantations in the Senegal river delta

Babacar Ndiaye, Jérôme Molénat, Seyni Ndoeye, Pascal Boivin, Claude Cheverry
et Chantal Gascuel-Oudoux

Volume 21, numéro 3, 2008

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/018778ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/018778ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Ndiaye, B., Molénat, J., Ndoeye, S., Boivin, P., Cheverry, C. & Gascuel-Oudoux, C. (2008). Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizi-
coles du Delta du Fleuve Sénégal. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water
Science*, 21(3), 325–336. <https://doi.org/10.7202/018778ar>

Résumé de l'article

La salinisation des sols constitue un risque majeur du développement de l'irrigation dans le monde. Dans le Delta du Fleuve Sénégal, l'existence d'une nappe phréatique salée et proche de la surface du sol accentue ce risque. Une modélisation des transferts hydriques a été réalisée pour mieux évaluer ce risque. Elle a été faite à partir du code Hydrus sur l'ensemble du cycle cultural et a pris en compte deux types de sol et deux modes de culture de cette région : la simple et la double culture. Elle a permis d'estimer les flux hydriques descendants pendant la phase d'irrigation par submersion, et les flux hydriques et salins ascendants pendant la phase d'irrigation et de non-irrigation. Cette modélisation indique que : i) le toit de la nappe salée remonte d'environ 50 cm pendant la phase d'irrigation; ii) une zone non saturée de faible épaisseur subsiste entre la surface inondée et la nappe; iii) l'infiltration cumulée est deux fois plus forte en double qu'en simple culture; et iv) la forte évaporation durant la phase de non-irrigation peut faire remonter entre 5,5 à 6 t de sels par ha et par an, selon les sols et les conditions de culture. Cette modélisation, qui s'appuie sur des mesures *in situ* des paramètres hydrodynamiques, devra être confrontée à des observations *in situ* de flux. Elle devra intégrer des processus non pris à ce stade tel que le piégeage d'air. Les relevés piézométriques depuis dix ans montrent, par ailleurs, un léger relèvement du niveau de la nappe salée. L'ensemble de ces résultats est suffisamment préoccupant pour préconiser, dans le cas d'une irrigation par submersion, la mise en place d'un drainage superficiel pour éviter le relèvement de la nappe et assurer l'évacuation des sels hors de la nappe et, par là, la pérennisation de l'agriculture dans cette région du Delta du fleuve Sénégal

MODÉLISATION DU TRANSFERT DE L'EAU ET DES SELS DANS LES CASIERS RIZICOLES DU DELTA DU FLEUVE SÉNÉGAL

Modelling water and salt transfer in rice plantations in the Senegal river delta

BABACAR NDIAYE^{1,2}, JÉRÔME MOLÉNAT¹, SEYNI NDOYE², PASCAL BOIVIN³, CLAUDE CHEVERRY¹, CHANTAL GASCUEL-ODOUX^{1*}

¹ INRA, Agrocampus ouest, UMR 1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, 35000 Rennes, France

² École supérieure polytechnique, Département génie civil, BP 5085, Dakar Fann, Sénégal

³ Haute école suisse, Genève EIL, 150, route de Presinge, 1254 Jussy, Confédération Helvétique

Reçu le 22 mai 2006, accepté le 2 octobre 2007

RÉSUMÉ

La salinisation des sols constitue un risque majeur du développement de l'irrigation dans le monde. Dans le Delta du Fleuve Sénégal, l'existence d'une nappe phréatique salée et proche de la surface du sol accentue ce risque. Une modélisation des transferts hydriques a été réalisée pour mieux évaluer ce risque. Elle a été faite à partir du code Hydrus sur l'ensemble du cycle cultural et a pris en compte deux types de sol et deux modes de culture de cette région : la simple et la double culture. Elle a permis d'estimer les flux hydriques descendants pendant la phase d'irrigation par submersion, et les flux hydriques et salins ascendants pendant la phase d'irrigation et de non-irrigation. Cette modélisation indique que : i) le toit de la nappe salée remonte d'environ 50 cm pendant la phase d'irrigation; ii) une zone non saturée de faible épaisseur subsiste entre la surface inondée et la nappe; iii) l'infiltration cumulée est deux fois plus forte en double qu'en simple culture; et iv) la

forte évaporation durant la phase de non-irrigation peut faire remonter entre 5,5 à 6 t de sels par ha et par an, selon les sols et les conditions de culture. Cette modélisation, qui s'appuie sur des mesures *in situ* des paramètres hydrodynamiques, devra être confrontée à des observations *in situ* de flux. Elle devra intégrer des processus non pris à ce stade tel que le piégeage d'air. Les relevés piézométriques depuis dix ans montrent, par ailleurs, un léger relèvement du niveau de la nappe salée. L'ensemble de ces résultats est suffisamment préoccupant pour préconiser, dans le cas d'une irrigation par submersion, la mise en place d'un drainage superficiel pour éviter le relèvement de la nappe et assurer l'évacuation des sels hors de la nappe et, par là, la pérennisation de l'agriculture dans cette région du Delta du fleuve Sénégal

Mots clés : Delta fleuve Sénégal, sol, modélisation hydrodynamique, nappe salée, irrigation, salinisation

*Auteur pour correspondance :

Téléphone: 33-2-23-48-54-32

Télécopie : 33-2-23-48-54-30

Courriel : chantal.gascuel@rennes.inra.fr

ABSTRACT

Soil salinisation is a major hazard of the extension of irrigation in the world. In the Delta of the Senegal River Valley, a highly saline groundwater close to the soil surface increases this hazard. A water and salt modeling by means of the Hydrus code has been performed to evaluate this hazard. Two soil types and two crop systems, a single and a double one, have been considered. The calculations have been performed on the complete agricultural cycle to determine water flows going down during the irrigation phase, and water and salt flows ascending to the soil surface during the irrigation and non irrigation phases. The modeling shows that: 1) the recharge due to the irrigation period induces an elevation of the water table of about 50 cm; 2) an unsaturated zone persists between the flooded surface and the water table; 3) the cumulative infiltration is two times higher in the double crop rice system than in the single crop system; 4) the high evaporation during the dry phase causes an ascension of from 5.5 to 6 t of salts per ha and per year according to the soil type and the crop system. This modeling, which was based on field measurements of hydrodynamic properties, has to be validated by field observations of the fluxes. Some processes such as air trapping should be tested. Piezometer monitoring over the past 10 years indicates a slight rise in the saline water table. All these results demonstrate the relevance of setting up a surficial drainage system for the flooded irrigation fields, to avoid an elevation of the water table and to evacuate salts from the soil surface, in order to perpetuate agriculture in the Delta of the Senegal River Valley.

Keywords: *Senegal River Valley, delta, soil, hydrodynamic modeling, salted groundwater, irrigation, salinisation*

1. INTRODUCTION

La salinisation des sols constitue l'un des facteurs majeurs de la baisse de la productivité agricole dans le monde. Ce phénomène touche près de 39 % des terres agricoles dans les régions arides (CHEVERRY et BOURRIE, 1998) sur tous les continents. Or, la croissance rapide de la population mondiale, notamment dans les pays à faible revenu, implique une augmentation de la productivité agricole qui suppose une extension des terres irriguées et un accroissement des rendements de ces cultures. L'irrigation requiert des ressources en eau importante, puisque près de 70 % des ressources en eau douce sont actuellement dévolues à la culture irriguée (BISWAS, 1993), alors que les tensions sur le partage de l'eau dans le monde s'avivent. En conditions arides, irriguer fait encourir aux sols des risques de salinisation. Ces enjeux

mettent en question le nécessaire développement de l'irrigation. Ils rendent la gestion rigoureuse des sols et des eaux en contexte d'irrigation extrêmement importante.

La salinisation d'un sol est due à la différence entre les flux de solutés entrants (irrigation, remontée par capillarité des nappes) et les flux sortants (percolation vers la nappe liée aux précipitations et/ou à l'irrigation, écoulement de base de la nappe, drainage). En situation de nappe peu profonde et de forte évapotranspiration, la différence entre le lessivage des sels sous l'effet des apports d'eau et leur remontée par capillarité aboutit souvent à une accumulation dans le profil et un dépôt de sels à la surface des sols. Ce phénomène, bien que connu depuis longtemps, n'a pas toujours reçu de solutions opérationnelles à cause de facteurs environnementaux, socio-économiques et de gouvernance : i) les conditions environnementales permettant techniquement le drainage (qualité du sol, position et écoulement de la nappe, existence d'un exhaure) ne sont pas toujours réunies; ii) la prévision des phénomènes sur le moyen terme reste une difficulté majeure du fait des multiples processus en jeu, dont certains sont méconnus, ou d'autres interagissent, ce qui limite ou paralyse l'élaboration de solutions; iii) les conditions socio-économiques (disponibilité et coût de l'eau, sécurisation des filières de production, bonne organisation professionnelle et professionnalisation des producteurs) et de gouvernance (mise en place de chartes des droits et devoirs depuis les associations de producteurs jusqu'aux partenaires économiques et institutionnels, lois et contrôles fonciers) sont également loin d'être réunies dans un environnement où la précarité domine (OSTROM, 1996); et iv) les systèmes traditionnels de gestion de l'eau restent mal connus ou peu transposables à des systèmes irrigués intensifiés. On estime ainsi que, chaque année, 10 millions d'hectares de terres irriguées sont perdus à cause d'une salinisation trop élevée des sols.

Certains contextes géographiques sont particulièrement sensibles à ces phénomènes de salinisation. C'est le cas du Delta de la vallée du fleuve Sénégal. La conductivité électrique des eaux de nappe est forte, en moyenne de 20 dS/m (OMVS/USAID, 1990), liée à la genèse du Delta. Une succession de transgressions et de régressions de l'océan Atlantique (MICHEL, 1973), a laissé dans le sous-sol sableux, à l'état fossilisé, une grande quantité de sels solubles. La surface de la nappe est peu profonde, fluctuant entre 1 et 3 m au cours de l'année (NDIAYE et ISABEL, 1999), ce qui peut induire des remontées capillaires importantes de sels vers la surface hors des périodes d'irrigation (RAES *et al.*, 1995; RAES et FEYEN, 1995). Enfin, les sols ont une épaisseur, des textures et des caractéristiques hydrodynamiques très variables, liées à la sédimentation. Une couche d'argile de surface, souvent présente dans les sols de cette région (AUDIBERT, 1967; MICHEL, 1973; NDIAYE et ISABEL, 1999), contrôle le débit d'infiltration de l'eau d'irrigation et le drainage des sels en profondeur. Des synthèses existent sur les sols de la région

et leurs propriétés hydrodynamiques (BOIVIN *et al.*, 1995; BOIVIN *et al.*, 1998). Certains processus hydrodynamiques et biogéochimiques y ont été finement étudiés aux échelles du profil et de la parcelle (BOIVIN *et al.*, 2002; FAVRE *et al.*, 1997; HAMMECKER *et al.*, 2003). Mais peu de travaux se sont intéressés à intégrer les connaissances en prenant en compte la variabilité des sols et des modes de culture pour estimer les flux sur l'ensemble du cycle de culture à l'échelle d'unités de gestion de l'eau (maille hydraulique, périmètre et dépression alluviale) (CEUPPENS et WOPEREIS, 1999; VAN ASTEN *et al.*, 2003).

Afin d'illustrer le problème posé par la salinisation des sols irrigués dans le delta du Sénégal et d'en dégager des perspectives de traitement, cet article se propose d'évaluer les transferts d'eau et de sels pendant un cycle de culture comprenant une culture de riz irrigué soit en simple, soit en double culture annuelle, durant laquelle il y a infiltration, puis un temps d'interculture, durant laquelle il y a évaporation depuis le sol et la nappe salée. Les flux hydriques sont calculés pour deux profils de sol type de cette région à partir du modèle HYDRUS 2D (SIMUNEK *et al.*, 1996). Le couplage à des flux salins est réalisé de manière simple. Cette approche est essentiellement fondée sur des données de la littérature et a pour objectif de fournir des ordres de grandeur des bilans hydriques et salins sur un cycle de culture pour quelques situations types.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Le delta du fleuve Sénégal

Le delta du fleuve Sénégal fait partie du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien situé entre 15°30' et 16°30' de longitude ouest et entre 16° et 17° de latitude nord (Figure 1). C'est une région assez plane bordée au nord et au sud-ouest par d'anciens massifs dunaires, dont l'altitude dépasse rarement 1 à 2 m IGN. C'est une zone de subsidence en bordure de l'anticlinal de Guiers, comblée par des sédiments marins et continentaux d'âge quaternaire (entre 40 000 et 5 000 BP de l'Inchirien I et II au Nouackchottien) provenant de l'érosion de roches primaires et antécambriennes sur lesquelles elle repose en discordance (AUDIBERT, 1967; MICHEL, 1973; VAN LAVIEREN et VAN WETTEN, 1990). Le climat est de type sahélien avec une pluviométrie de l'ordre de 300 à 400 mm/an. Quelques dépressions sont remplies naturellement par les crues du fleuve. Les principaux facteurs de formation des sols sont la fréquence et la durée de l'inondation par la crue (RAES *et al.*, 1995; RAES et FEYEN, 1995). D'autres théories font également intervenir la pédogenèse sulfatée acide qui a succédé au retrait de la mer, et la redistribution éolienne des sels (BARBIERO *et al.*, 2005). Les sols du delta présentent une texture allant du sable grossier (anciens bourrelets de berge) à l'argile (zones de décantation ou cuvettes). Ils sont subdivisés en deux grands

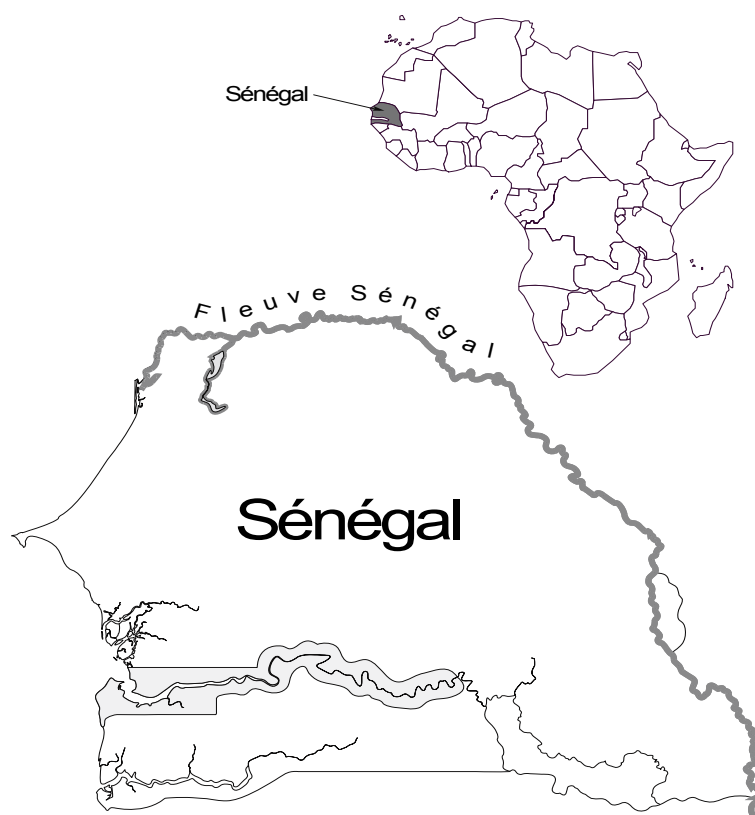


Figure 1. Localisation du Fleuve Sénégal.
Map of the Delta of the Senegal River Valley.

types bien qu'un *continuum* textural les relie (BOIVIN *et al.*, 1995, 1998; LOYER, 1989) :

- les Hollaldés, les plus fréquents, sols lourds de texture argileuse (60 % d'argile en moyenne) formés par l'accumulation des dépôts fluviaux lors de la décantation des eaux de crue et situés dans les dépressions. Ils présentent une très grande variabilité spatiale en terme de texture;
- les Fondés, sols de texture sableuse (70 % de sable, 30 % d'argile), situés sur les bourrelets de berges, donc de surface relativement limitée.

Les sols non cultivés présentent souvent une salinité très élevée, soit plusieurs mS cm⁻¹ sur extrait 1/5 (LOYER, 1989 pour une revue) ce qui limite le développement de la végétation naturelle souvent halophyte. Une cartographie des sols du delta est donnée par FAO/SEDAGRI (1969), mais cette dernière a souvent sous estimé la présence de sels, la prospection étant limitée à 1,2 m de profondeur et la variabilité spatiale de la salinité étant très grande (BARBIERO *et al.*, 2004; GASCUEL-ODOUX et BOIVIN, 1994).

Le toit de la nappe se trouve en général à faible profondeur, fluctuant entre 1 et 3 m au cours de l'année. Cette nappe a une épaisseur moyenne d'environ 10 m, moins importante à l'est avec moins de 5 m près de Richard-Toll et Dagana, qu'à l'ouest et au nord de Saint-Louis où elle atteint plus de 30 m. La carte piézométrique obtenue lors de la tournée du 15 au 19 avril 1987 (OMVS/USAID, 1990) montre que la nappe se situe en fin de saison sèche au niveau zéro IGN. Près des zones de recharge, dans les périmètres irrigués de Keur Massène et de Richard-Toll, des niveaux élevés de 0 à 1,5 m sont notés. L'intense évapotranspiration dans les dunes de sables et dans le lac de Guiers est à l'origine des niveaux très bas présents au nord-ouest de Rosso et à l'ouest du lac de Guiers.

2.2 Le contexte de la riziculture dans le Delta du fleuve Sénégal

La pratique de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal remonte au XIX^e siècle mais son expansion véritable n'a eu lieu qu'à partir du début des années 60 grâce notamment à la création de la SAED (Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta) en 1965. En 25 ans (1965 - 1990), les superficies aménagées sont passées de 6 500 à 32 270 ha (SAED, 1997). Aujourd'hui, avec 70 000 ha aménagés dont environ 50 000 ha dans le Delta, la rive gauche du fleuve Sénégal est l'une des grandes zones d'irrigation de l'Afrique de l'Ouest. Le riz est la principale culture vivrière pratiquée sur ces aménagements hydroagricoles. Le rendement potentiel du riz y est très élevé dans la région, de l'ordre de 10 à 11 t/ha (ADRAO, 1995), et la double culture annuelle est possible.

La sécurisation de l'exploitation des terres a été rendue possible par la construction de deux barrages par l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve SÉNÉGAL regroupant les pays riverains SÉNÉGAL, MALI et MAURITANIE, figure 1) : celui de Manantali de régularisation du débit du fleuve, achevé en mars 1998, et celui antisel de Diama, mis en service en 1986. Ces deux barrages ont rendu l'irrigation possible durant toute l'année. De plus, toute la rive gauche du delta a été endiguée pour protéger les terres des inondations, augmentant ainsi la superficie des terres exploitables. Deux types d'aménagements se rencontrent dans le delta : les aménagements réalisés sur fonds publics ou aménagements SAED, sur environ 15 000 ha, et les aménagements réalisés sur fonds privés sur environ 30 000 ha.

Les aménagements SAED, d'une superficie unitaire de 200 à 2 000 ha, réalisés pour la plupart durant les années 70, sont caractérisés par la présence d'un bon réseau d'irrigation (canaux en argile compactée) et d'un réseau de drainage peu profond. Les aménagements privés sont apparus pendant les années 90, suite à la libéralisation de la filière rizicole et la rétrocession de la gestion financière de l'eau aux communautés rurales. De taille modeste, entre 5 et 50 ha, ils sont caractérisés par un réseau d'irrigation sommairement réalisé, un planage déficient et par l'absence d'un système de drainage. C'est une agriculture irriguée itinérante; les cultures changent de lieu avec l'aménagement de nouvelles parcelles; les aménagements sont souvent abandonnés après quelques années d'exploitation, la salinisation étant une des causes invoquées pour expliquer ces abandons. C'est pour répondre aux interrogations que posent ces pratiques que cette étude a été réalisée.

2.3 Les données

Neuf piézomètres ont été implantés dans la cuvette de Ndellé de manière à observer les variations de nappe en fonction de la distance au système de drainage : cinq piézomètres sont sur une parcelle d'exploitation en double culture (maraîchère en contre-saison et rizicole en hivernage); un piézomètre est sur une parcelle voisine de la précédente mais en jachère depuis deux ans et non soumise à l'irrigation; deux piézomètres sont placés le long du canal principal d'irrigation, le premier à quelques dizaines de mètres de la station de pompage et le second un peu plus vers l'intérieur des terres; un piézomètre est positionné au niveau du canal principal de drainage à la limite des périmètres de la cuvette.

Quatre campagnes de mesures ont été effectuées en mars, avril, mai et juillet 2004. À chaque campagne, les niveaux piézométriques ont été mesurés ainsi que quelques caractéristiques physico-chimiques des eaux de nappe (conductivité électrique, pH, température). L'ensemble de ce suivi a permis de définir les conditions aux limites de la modélisation.

Les courbes de rétention et la conductivité hydraulique à saturation des sols de type Fondé, Hollaldé et de la couche Nouackchotienne contenant la nappe phréatique salée ont été déterminées. La courbe de rétention a été mesurée au laboratoire par la méthode des presses de Richards. La conductivité hydraulique à saturation a été déterminée sur le terrain par la méthode Porchet. Les paramètres hydrodynamiques de ces trois sols ont été estimés selon le modèle de Van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980) à l'aide du logiciel RETC (VAN GENUCHTEN *et al.*, 1991) :

$$\theta(h) = \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m \quad (1)$$

avec θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) la teneur en eau résiduelle et θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) la teneur en eau à saturation, h la charge capillaire. La teneur en eau résiduelle est fixée à zéro (valeur mesurée au potentiel - 1 585 kPa). La teneur en eau à saturation a été mesurée en début d'essai et n'a pas fait l'objet de calage. Le paramètre m a été pris égal à $1 - \frac{1}{n}$ (MUALEM, 1976). Seules les valeurs de α (cm^{-1}) et n sont donc déterminées par ajustement.

La courbe de conductivité hydraulique est également estimée à partir du modèle de Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) :

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^m)^m \right]^2 \quad (2)$$

avec S_e (-) la saturation effective définie par :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

avec K_s (cm/h) la conductivité hydraulique à saturation. Le paramètre m est pris égal à $1 - \frac{1}{n}$ comme précédemment et le paramètre de connectivité des pores l est égal à 0,5, valeur moyenne issue de 45 sols (MUALEM, 1976).

HAMMECKER *et al.* (2003) donnent aussi pour un profil de sol Hollaldé situé dans la zone de Podor les paramètres hydrodynamiques mesurés au laboratoire par la méthode des presses de Richards et sur le terrain par infiltromètre à disque et méthode Porchet.

Après analyse de l'ensemble de ces résultats, un profil de sol type de la cuvette de Ndellé a été construit, basé sur les références de la littérature les plus proches des valeurs mesurées. Les paramètres des courbes caractéristiques ont été déduits en vue de la modélisation hydrodynamique (Tableau 1).

2.4 La modélisation hydrodynamique

Le modèle HYDRUS 2D (SIMUNEK *et al.*, 1996) a été utilisé. Il résout numériquement l'équation de Richards pour les flux d'eau en conditions saturée et non saturée :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (4)$$

avec θ la teneur en eau volumique [$\text{L}^3 \text{L}^{-3}$], h la charge capillaire [L], K la conductivité hydraulique [LT^{-1}], z la profondeur orientée positivement vers le haut [L], t le temps [T] et S un terme source (pluie et/ou irrigation) ou évaporation.

Le modèle a été utilisé en monodimensionnel vertical : un domaine de simulation rectangle de 200 cm de profondeur sur 1 cm de largeur a été défini. Les conditions aux limites ont été choisies en accord avec les conditions observées sur le terrain lors des campagnes de mesures sur le site de Ndellé en 2004 :

- la surface supérieure est soumise aux conditions atmosphériques. Ces conditions permettent de tenir compte de la lame d'eau de 10 cm maintenue dans la parcelle pendant la phase de culture (culture en inondation) simulée comme un potentiel imposé et de l'évolution de l'évapotranspiration simulée à partir du module d'évapotranspiration de HYDRUS qui utilise les résultats de FEDDES *et al.* (1978). La profondeur de la zone racinaire est fixée à 30 cm (PGE, 1991; 1993). L'évapotranspiration de référence ET0 a été calculée selon

Tableau 1. Valeurs des paramètres du modèle de Van Genuchten-Mualem pour l'estimation des propriétés hydrodynamiques.

Table 1. Parameter values used to estimate hydrodynamic properties in the Van Genuchten-Mualem model.

| | θ_r | θ_s | α (cm^{-1}) | n | K_s (cm/j) | Référence |
|--------------------|------------|------------|-------------------------------|--------|--------------|--------------------------------|
| hollaldé 0 - 20 cm | 0 | 0,44 | 0,00049 | 1,2968 | 0,24 | Raes <i>et al.</i> 1995 |
| fondé 0 - 20 cm | 0 | 0,39 | 0,0011 | 1,2287 | 0,53 | Raes <i>et al.</i> 1995 |
| 20 - 100 cm | 0 | 0,355 | 0,00139 | 1,875 | 4,76 | Hammecker <i>et al.</i> , 2003 |
| 100 - 200 cm | 0 | 0,41 | 0,0615 | 1,3127 | 54,3 | Raes <i>et al.</i> 1995 |

la méthode de la FAO (DOORENBOS et PRUITT, 1977). L'évapotranspiration potentielle pour le riz ETP a été calculée en multipliant ET_0 par un coefficient cultural kc dépendant du stade de développement de la culture du riz. Le coefficient a été fixé à 1,15 pour le premier et le second mois, à 1,3 au stade intermédiaire et à 1,05 pour le dernier mois. En phase de culture, l'évapotranspiration potentielle est $kc \cdot ET_0$, pendant 100 j en simple culture, 200 j en double culture. En phase de non-culture, seule l'évapotranspiration de référence ET_0 est prise en compte (Figure 2). Dans ce calcul, la différence entre simple culture et double culture ne porte que sur la période comprise entre le 100^e et le 200^e jour, avec une différence de l'ordre de 1 à 1,3 fois. Ce mode de calcul surestime les flux du sol vers l'atmosphère en phase de culture puisque ces flux se limitent à de la transpiration du fait de lame d'eau d'irrigation qui annule toute évaporation venant du sol et en phase de non-culture puisque les flux vers l'atmosphère se limitent au contraire à de l'évaporation;

- les bords latéraux sont soumis à une absence de flux;
- la limite inférieure du domaine est représentée par un drainage profond prenant en compte la nappe superficielle salée qui peut être rechargée par l'eau d'irrigation qui s'infiltre ou être soumise à l'évaporation pendant la phase sèche. Les flux de nappe à la base du profil du sol, q , dépendent de la profondeur de la nappe, Z_{nappe} , par rapport à la surface du sol (HOPMANS et STRICKER, 1989) et sont évalués par la relation :

$$q(t) = A * \exp(B |Z_{\text{nappe}}(t)|) \quad (5)$$

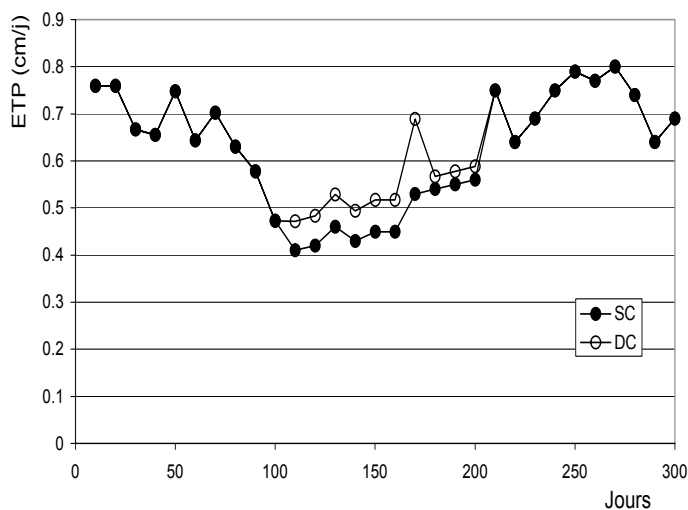


Figure 2. Estimation de l'ETP pour deux systèmes de culture : SC, simple culture sur 100 j puis 200 j sans irrigation; DC, double culture sur 200 j, puis 100 j sans irrigation.
Estimation of potential evapotranspiration (PET) for the two crop systems: SC, one single irrigated crop during 100 d then 200 d without irrigation; DC, two irrigated crops during 100 d each, then 100 d without irrigation.

avec A et B des paramètres empiriques. La profondeur de la nappe est calculée à chaque pas de temps à partir de l'altitude de la surface du sol (GWL0L dans Hydrus) et de la charge de pression, h , à la base du profil de sol.

La durée de cycle du riz est de 100 jours (PGE, 1991; 1993). Pour chaque type de sol, Fondé et Hollaldé, on simule, en simple culture, une phase de culture irriguée de 100 jours suivie d'une phase sèche de 200 jours. En double culture, une phase de culture irriguée de 200 jours suivie d'une phase sèche de 100 jours. L'état hydrique initial du profil est défini comme un profil d'équilibre à partir d'une nappe située à une profondeur de 1,50 m pour les simulations en phase de culture. En phase de non-culture, le profil initial est celui obtenu en fin de simulation de la phase de culture précédente, que l'on soit en simple ou en double culture.

2.5 L'estimation des flux salins

Dans les rizières tropicales, la forte évaporation fait que l'horizon supérieur sèche rapidement, 15 à 20 jours après l'arrêt de l'irrigation (LEGAL, 1993). Les sels sont alors transportés depuis la nappe vers la surface par ascension capillaire. L'apport de sel pour une lame d'eau de 1 mm comportant une conductivité électrique de 1 dS/m est de l'ordre de 6,4 kg/ha. ABROL *et al.* (1988) estiment, en effet, que 1 dS/m correspond à 640 mg/L. Les flux remontants de la nappe sont estimés égaux aux flux verticaux ascendants traversant le sol à 1 m de profondeur au cours de la période de non-culture. Ce sont, en effet, ces flux qui sont considérés comme critiques pour la salinisation des sols en riziculture.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats de la modélisation hydrodynamique

En début d'irrigation, le modèle simule une infiltration de l'eau d'irrigation dans le sol qui arrive rapidement à la nappe. La recharge de la nappe débute environ 20 jours après le début de l'irrigation. La figure 3 donne le profil de pression capillaire calculé à la fin de la phase d'irrigation, après 100 ou 200 jours d'irrigation, selon que l'on soit en simple ou en double culture, et ce, pour les Fondés et les Hollaldés. Selon le modèle, même en cas de double culture, le front d'humectation correspondant à l'eau d'irrigation par submersion n'atteint pas la nappe bien que le flux de recharge soit important. Avec nos hypothèses d'écoulement de base de la nappe, la remontée du toit de la nappe est estimée à environ 50 cm pour les Fondés, plus sableux, et de 25 cm pour les Hollaldés, plus argileux (Figure 3, Tableau 2). La mise en culture en contre-saison, en

système de double culture donc, ne semble que peu influencer le relèvement de la nappe. Ce relèvement est de 10 cm pour les Fondés et de 5 cm pour les Hollaldés. Le modèle calcule une nappe perchée en surface sur à peine 10 cm en relation avec la lame d'eau d'irrigation. Une zone non saturée subsiste d'environ 80 cm pour les Fondés et de 100 cm pour les Hollaldés.

La modélisation indique une infiltration cumulée deux fois plus importante en double culture qu'en simple culture. L'évolution du profil hydrique induirait ainsi peu d'évolution

de l'infiltration instantanée au cours du temps, donc pas de diminution de la capacité d'infiltration des deux sols au cours de la saison d'irrigation. L'estimation de la transpiration est logiquement deux fois plus importante en double culture qu'en simple culture. L'infiltration calculée est plus importante, de 25 % environ, dans les Fondés que dans les Hollaldés, quelle que soit la durée de l'irrigation. En effet, la lame d'eau infiltrée est de 127 cm en simple culture et de 255 cm en double culture pour les Fondés, alors qu'elle est de 99 cm en simple culture et de 195 cm en double culture pour les Hollaldés.

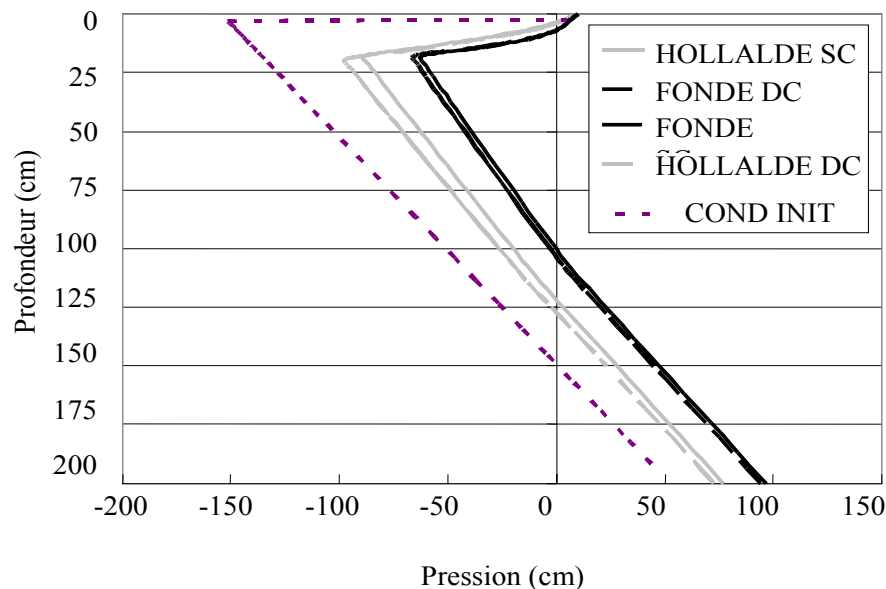


Figure 3. Profil de pression capillaire simulé en fin de période d'irrigation sur sol fondé et sur sol hollaldé, en simple culture (SC) et en double culture (DC).
Capillary tension profile at the end of irrigation on Fondé and Hollaldé soil, with a single and a double crop system.

Tableau 2. Somme de flux journaliers calculés par le modèle sur Fondé et sur Hollaldé, en simple culture (SC : culture sur 100 j puis 200 j sans irrigation) et en double culture (DC : culture sur 200 j, puis 100 j sans irrigation). Les flux ascendants de nappe correspondent aux flux verticaux calculés à un mètre de profondeur. Le drainage correspond à la somme des flux journaliers sortants à la base du profil.

Table 2. Results of the modeling on Fondé and Hollaldé soils, considering one single crop (irrigated crop during 100 d then 200 d without irrigation) and a double crop system (two irrigated crops during 100 j each, then 100 d without irrigation). Upward water fluxes from groundwater correspond to simulated upward fluxes at 1 m depth in the soil. Cumulative water drainage was calculated as the sum of the daily outflow at the soil bottom.

| | PÉRIODE D'IRRIGATION | | | | | PÉRIODE DE NON-IRRIGATION | | |
|-------------|----------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|
| | Infiltration (cm) | Drainage (cm) | Remontée de la surface de nappe (cm) | Transpiration (cm) | Évaporation (cm) | Drainage (cm) | Flux ascendant de nappe (cm) | Flux de sel (t/ha) |
| FONDE SC | 127 | 89 | 50 | 35,2 | 40,9 | 7,8 | 11,6 | 5,9 |
| FONDE DC | 255 | 178 | 40 | 73,2 | 35,3 | 6,4 | 10,7 | 5,5 |
| HOLLALDE SC | 99 | 46 | 25 | 51,5 | 43,9 | 7,5 | 11,8 | 6,1 |
| HOLLALDE DC | 195 | 93 | 20 | 99,7 | 40,1 | 6,1 | 11,1 | 5,7 |

La consommation en eau apparaît plus importante en système de double que de simple culture. Cependant, si on admet que le potentiel de production double, alors le rendement potentiel par rapport à la consommation en eau reste identique.

En période d'irrigation, la comparaison des termes « puits » du bilan hydrique issus du modèle montre qu'avec les valeurs adoptées, les flux cumulés de drainage par la nappe à la base du profil sont plus importants que les flux cumulés de transpiration pour les Fondés, quel que soit le système de culture et peu différents pour les Hollaldés, quel que soit le système de culture (Tableau 2). Les Fondés « consommeraient » ainsi plus d'eau au profit d'un drainage plus important. Ces différences entre les sols portent sur l'ensemble des termes d'infiltration, de drainage et de transpiration, mettant ainsi en évidence un fonctionnement hydrique différent pour les deux sols, lié à leurs propriétés hydrodynamiques (Tableau 1). Les Fondés dont la conductivité hydraulique est plus élevée et la rétention de l'eau plus faible que les Hollaldés, en raison notamment de leur texture sableuse, présentent des flux cumulés d'infiltration plus forts, un drainage plus important mais des flux cumulés de transpiration plus faibles quel que soit le système de culture.

En période de non irrigation, le modèle simule une évaporation du sol assez semblable dans les quatre situations considérées. On note, toutefois, une évaporation un peu plus forte en simple culture qu'en double culture, d'environ 13,7 % pour les Fondés et de 8,6 % pour les Hollaldés. Ces différences entre simple et double culture pour un même type de sol restent faibles au regard des durées de non-irrigation pour chaque système de culture (200 j et 100 j). Ceci montre qu'en s'asséchant, le sol ne serait plus en capacité d'assurer la demande évaporatoire de l'atmosphère pendant toute la durée de la période de non-irrigation, notamment en double culture.

Le bilan hydrique sur l'ensemble de la période culturale, période d'irrigation et période de non-irrigation comprises, fait apparaître des estimations assez différentes entre les deux sols. Ainsi, en simple culture, les flux cumulés d'évaporation et de transpiration (76,1 cm) apparaissent un peu inférieurs aux cumuls de drainage par la nappe à la base du profil (96,7 cm) pour les Fondés, alors que pour les Hollaldés il y a prépondérance de la transpiration et de l'évaporation (95,4 cm) sur les pertes par drainage (53 cm). En revanche, en double culture, les pertes par drainage dans les Fondés (184,4 cm) apparaissent largement supérieures à celles par évaporation et transpiration (108,5 cm). Pour les Hollaldés, on conserve en double culture la prépondérance de la transpiration et de l'évaporation (139,8 cm) sur le drainage (99,1 cm). La modélisation montre également un sol qui s'assèche globalement au cours de la période de culture quel que soit le type de sol, et quel que soit le système de culture. En effet, le bilan total établi par la différence entre les pertes (drainage, évaporation et transpiration) et les apports d'eau (infiltration) fait apparaître systématiquement un déficit.

Le déficit est estimé par la modélisation entre - 38 cm pour les Fondés en double culture et - 49 cm dans les Hollaldés en simple culture. Ce déficit résulte des conditions initiales fixées sous la forme d'un profil hydrostatique. Un profil hydrostatique surestime le profil d'humidité dans les sols en début de saison culturale.

3.2 Estimation des flux salins par modélisation

La modélisation donne des flux de remontée de la nappe par ascension capillaire pendant la phase sèche qui sont utilisés pour évaluer les quantités de sels transportées en surface (Tableau 2). Elles s'évaluent entre 5,5 et 6,1 tonnes par ha. Ces quantités sont donc relativement importantes, très proches les unes des autres selon les sols et les systèmes de culture. Les flux salins sont un peu plus faibles en double culture qu'en simple culture, en relation avec le calcul des flux d'eau ascendants provenant de la nappe. Pour les mêmes raisons, les flux salins sont un peu plus faibles pour les Fondés que pour les Hollaldés. Ces valeurs sont toutes plus importantes que celles données par RAES *et al.* (1995) pour des périmètres proches de la zone d'étude qui fournissent des valeurs de remontées de sels de l'ordre 3 t/ha/an. L'écart entre les valeurs de RAES *et al.* (1995) et les nôtres provient de l'estimation des flux ascendants de nappe. Alors qu'ils estiment les flux ascendants de nappe entre 0,08 et 15 mm/j pendant la période non irriguée, nous les estimons entre 0,2 et 0,4 mm/j. Ces différences peuvent provenir des propriétés hydrodynamiques retenues dans chacune des deux études. Nos estimations de remontée saline restent cependant dans la gamme de valeurs estimées par le projet PGE (1993).

3.3 Confrontation des hypothèses et des résultats de la modélisation aux données de terrain

Ces estimations obtenues par modélisation doivent être discutées au regard des processus pris en compte dans la modélisation des observations de terrain disponibles.

En ce qui a trait au processus, le modèle retient des hypothèses de milieu homogène à structure constante. Certains processus structuraux et de transferts observés sur ces sols, notamment sur les Hollaldés qui sont des sols argileux gonflants, n'ont pas été modélisés. Il s'agit, premièrement, de la fissuration qui a lieu dans la couche argileuse de surface qui présente en général des fissures importantes jusqu'à 30 cm de profondeur pendant la période sèche avant irrigation. Le rôle de ces fissures sur le transfert de l'eau et des sels peut être important. Il a été étudié par FAVRE *et al.* (1997) et HAMMECKER *et al.* (2003). FAVRE *et al.* (1997) montrent que les fissures se referment rapidement après le début de l'irrigation, en moins de 4,5 heures. Leur

participation directe dans le bilan hydrique pourrait donc être considérée comme minime. Il s'agit, deuxièmement, du piégeage d'air dans une zone non saturée assez développée, résultant de la formation d'une nappe perchée. Ce processus contribue à diminuer fortement les débits de percolation de l'eau d'irrigation (BOIVIN *et al.*, 1998; HAMMECKER *et al.*, 2003). Il est accentué dans les sols fissurés du fait de la fermeture rapide des fissures qui piège l'air dans les polygones entre les fissures, la nappe et la lame de submersion. Cette zone située entre 40 et 60 cm apparaît bien dans le modèle, mais on ne lui a pas conféré de propriétés particulières. De plus, la porosité structurale des Hollaldés va être fortement réduite lorsque la teneur en eau du sol augmente, en raison des phénomènes de gonflement (BOIVIN *et al.* 2004; 2006). Ces observations montrent qu'il faut considérer les estimations des flux par modélisation sur les Hollaldés avec prudence, en tout cas avec plus de prudence que sur les Fondés. Le recours à des modèles représentant les processus spécifiques des sols gonflants serait important pour les Hollaldés. Cependant, ces modèles ne décrivent pas encore des dynamiques structurales annuelles. À l'opposé, on peut considérer les estimations sur les fondés comme relativement bonnes. DIAW *et al.* (2002) ont obtenu des résultats similaires aux nôtres par observation *in situ* et modélisation pour un Fondé situé en moyenne vallée du fleuve Sénégal.

La modélisation est une modélisation unidimensionnelle et ne prend pas en compte les flux d'eau latéraux dans la nappe. Or, ceux ci peuvent être importants dans les niveaux sableux, de sorte que le niveau de la nappe peut être sous le contrôle des niveaux des bras du fleuve voisin, comme montré par DIAW (1996). Une perspective serait d'introduire dans la modélisation des conditions aux limites différentes pour tenir compte de contrôles externe du niveau de la nappe. Enfin, la demande

évaporatoire pourrait être mieux estimée en tenant compte des suivis de Rice Garden effectués par l'ADRAO (Association pour le Développement du Riz en Afrique de l'Ouest).

La validation du modèle, toujours difficile à l'échelle locale compte tenu de la variabilité des sols au sein de la parcelle et des dynamiques rapides de la structure des sols, pourrait privilégier une approche globale à l'échelle de la parcelle agricole, voire de l'unité de gestion de l'eau, c'est-à-dire la maille hydraulique ou le périmètre, car : i) à cette échelle les paramètres moyens sont plus faciles à saisir; ii) c'est à cette échelle que l'irrigation est décidée et contrôlée; et iii) c'est donc également à ce niveau que le bilan salin peut être raisonné.

Nos observations de terrain portent sur le niveau de la nappe et la salinité des eaux. Ainsi, une tendance au relèvement de la nappe d'environ 3 cm/an est observée à partir de mesures pendant dix ans sur un piézomètre situé dans la zone d'étude (Figure 4). Cependant, d'autres études (DIAW *et al.*, 2002) montrent que l'existence de connexions hydrauliques du cours d'eau avoisinant vers la nappe peut aussi contribuer au contrôle du niveau de la nappe. Une remontée, qu'elle soit liée à l'irrigation ou à des déséquilibres à plus large échelle, est observée. En tant que telle, elle met en danger le développement de la riziculture si la nappe salée atteint la zone racinaire. En revanche, la remontée de la nappe permet de prévenir les risques d'acidification dus à l'oxydation de la pyrite parfois présente en profondeur dans le delta. En effet, une baisse trop forte de la nappe induirait une oxydation de la pyrite et sa transformation en acide sulfurique (DECKERS *et al.*, 1996). Les paramètres de la qualité de l'eau de la nappe mesurés au niveau des ouvrages dans le périmètre de Ndellé (Tableau 3) montrent que la conductivité électrique de la nappe, de 8 dS/m, est très élevée traduisant une salure importante, contrairement à celle

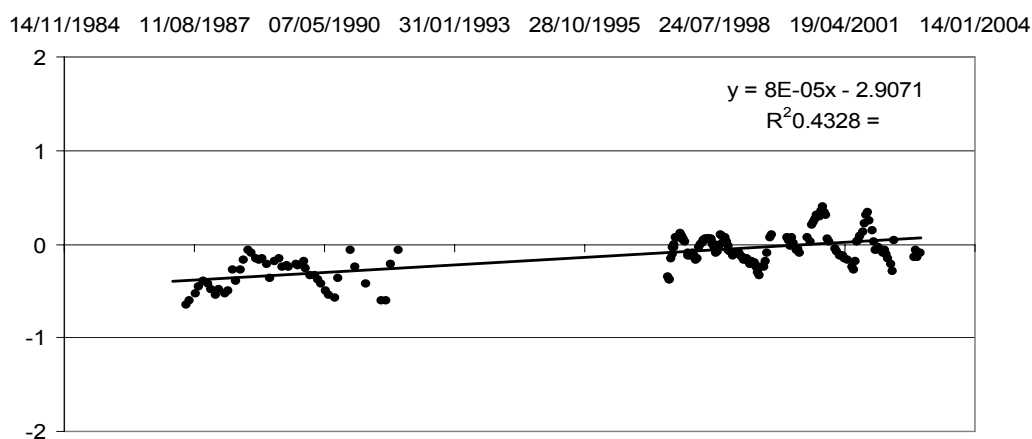


Figure 4. Évolution du niveau piézométrique de l'ouvrage GA00076 du réseau OMVS situé dans le périmètre de Ndellé entre 1984 et 2004 : point de mesure (•) et tendance (ajustement linéaire).
Variations of the water table for piezometer GA00076 belonging to the OMVS network located in the perimeter of Ndellé between 1984 and 2004 : sample points (•) and trend (linear fitting).

Tableau 3. Paramètres de la qualité de l'eau sur le dispositif de Ndellé.
Table 3. Water quality parameters at the Ndellé experimental site..

| | Nappe | Drain | Station de pompage |
|----------------------|-------|-------|--------------------|
| Conductivité (mS/cm) | 8 | 0,3 | 0,09 |
| pH | 6,6 | 8,8 | 6,7 |
| SAR | 4,08 | 2,71 | 0,23 |

de la station de pompage installée sur le cours d'eau Lampsar de 0,09 dS/m. L'eau d'irrigation est faiblement sodique. Son Sodium Adsorption Ratio (SAR) (Sposito *et al.*, 1977) :

$$SAR = \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{0,5}} \quad (6)$$

est de 0,23, les concentrations étant exprimées en milliéquivalents par litre, contrairement à celle de la nappe qui peut être considérée comme impropre à l'irrigation avec un SAR de 4,08. Les eaux de drainage, avec un SAR de 2,71, sont quasiment aussi sodiques. Ceci indique que les remontées salines par capillarité, sans pouvoir les quantifier par cette approche, sont bien une source réelle de salinisation des sols depuis la nappe.

La simulation que nous avons effectuée, comme les résultats précédemment obtenus, montrent que la riziculture, tout en maintenant une lame de submersion sur les parcelles, contribue à recharger les nappes si leur écoulement de base est insuffisant. Ces nappes étant salées et peu profondes dans le delta, la remontée de l'eau par capillarité est un facteur de mobilisation des sels vers la surface sur les sols non submergés : parcelles en jachère et sols environnant les périmètres. Alors que le drainage profond est difficile et risque même de provoquer une alcalinisation des sols par sodisation (LE BRUSQ et LOYER, 1983), cette remontée peut être exploitée pour faire un drainage de surface (QADIR *et al.*, 1998). Ce constat justifie également de considérer l'impact salin de la riziculture à l'échelle des unités hydro-géologiques naturelles (cuvettes alluviales, portion de la vallée) et/ou à celle des unités de gestion de l'eau (maille hydraulique, périmètre irrigué).

4. CONCLUSION

La nappe phréatique salée du delta du fleuve Sénégal constitue une source de salinisation des sols et donc un frein

potentiel au développement agricole de la région. Les transferts hydriques et salins en système de simple et de double culture annuelle ont été modélisés pour deux types de sol de cette région à l'aide du code HYDRUS 2D. En dépit de fonctionnements hydriques assez différents, les bilans salins sont contrôlés par les conditions aux limites et donc assez proches mais aussi assez importants pour les différentes situations considérées. Les risques de salinisation semblent légèrement accrus par la double culture, celle-ci se traduisant par une remontée de la nappe et des quantités de sels mobilisés par ascension capillaire les plus importantes. La modélisation propose un relèvement de la nappe entre 25 et 50 cm selon les sols pendant la phase d'irrigation. Pendant la phase sèche, il existe une remontée des sels de la nappe vers la surface que nous avons évaluée par modélisation entre 5,5 et 6 t/ha/an. Ces estimations par modélisation devront être validées par des mesures de terrain : elles apparaissent plus incertaines pour les Holladés (sols argileux gonflants) du fait de processus non pris en compte dans la modélisation retenue que pour Fondés (sols sableux). Elles sont cependant suffisamment élevées pour que l'on y prenne attention en terme de gestion de l'eau et inciter à des mesures préventives : la mise en place d'un système de drainage agricole apparaît ainsi nécessaire, d'une part pour diminuer les quantités d'eau drainées en profondeur et contrôler le toit de la nappe, d'autre part pour évacuer les sels en dehors de la nappe. Cette gestion apparaît comme une garantie de pérennité de la riziculture dans la zone du delta du fleuve Sénégal. Ces résultats peuvent expliquer la pratique de l'agriculture itinérante par les petits exploitants : ceux-ci ne mettent pas en place un drainage de surface mais, par une pratique itinérante, limitent globalement ces flux et les effets cumulatifs interannuels. La SAED, en relation avec les producteurs, devrait promouvoir un système de drainage superficiel, même sommaire, en vue de garantir la durabilité de ces systèmes de culture. Il est important de noter que tant du point de vue de la compréhension des processus que de la gestion de l'eau, notre étude milite pour une approche à l'échelle des unités de gestion de l'eau.

REMERCIEMENTS

Cet article est dédié à Babacar Ndiaye, initiateur et directeur de ce travail, décédé le 15 janvier 2007 à Dakar. Babacar Ndiaye était un collègue de talent qui avait travaillé à un partenariat très apprécié de tous. Nous remercions par ailleurs l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) qui a financé le projet, le séjour Postdoctoral de Babacar Ndiaye à l'UMR Sol Agronomie Spatialisation à Rennes, ainsi que le personnel de la SAED (Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta) qui a soutenu les activités de terrain.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABROL I.P., J.S.P. YADAV et F.I. MASSOUD (1988). Salt-affected soils and their management. FAO, Rome, Italie. *FAO Soil Bull.* 39, 131 p.
- ADRAO (1995). Association pour le Développement du Riz en Afrique de l'Ouest, *Rapport annuel 1994*, Bouaké, Côte d'Ivoire.
- AUDIBERT M. (1967) *Delta du fleuve Sénégal : Étude hydrogéologique*. Saint-Louis, Sénégal, Rapport projet AFR-REG-61, 4 volumes.
- BARBIERO L., A.O. MOHAMEDOU, C. LAPERROUSAZ, S. FURIAN et S. CUNNAC (2004.) Polyphasic origin of salinity in the Senegal delta and middle valley. *CATENA*, 58, 101-124.
- BARBIERO L., A.O. MOHAMEDOU et L. ROGER (2005). The origin of vertisols and their relationship to acid sulfate soils in the Senegal Valley. *CATENA*, 59, 93-116.
- BISWAS A.K. (1993). Water for agricultural development : opportunities and constraints. *Intern. J. of Water Resour. Develop.*, 9, 3-12.
- BOIVIN P., D. BRUNET, C. GASCUEL-ODOUX, P. ZANTE et J.P. NDIAYE (1995). Les sols argileux de la région de Nianga-Podor : répartition, caractéristiques, aptitudes et risques de dégradation sous irrigation. Dans *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*, BOIVIN P., DIA I, LERICOLLAIS A., POUSSIN J. C., SANTOIR C. et SECK S. M. [Éditeurs], pp. 67-81.
- BOIVIN P., FAVRE F. et MAEGHT J.L. (1998). Les sols de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal : caractéristiques et évolution sous irrigation. *Étude gestion sols*, 5, 235-246.
- BOIVIN P., P. FAVRE, C. HAMMECKER, J.L. MAEGHT, J. DELARIVIERE, J.C. POUSSIN et M.C.S WOPEREIS (2002) Processes driving soil solution chemistry in a flooded rice-cropped vertisol: analysis of long-time monitoring data. *GEODERMA*, 110, 87-107.
- BOIVIN P., P. GARNIER et D. TESSIER (2004). Relationship between clay content, clay type and shrinkage properties of soil samples, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 1145-1153.
- BOIVIN P., P. GARNIER et M. VAUCLIN (2006). Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1082-1093.
- CEUPPENS J. et M.C.S. WOPEREIS (1999). Impact of non-drained irrigated rice cropping on soil salinization in the Senegal River Delta, *GEODERMA*, 92, 125-140.
- CHEVERRY C. et G. BOURRIE (1998). La salinisation des sols. Dans : *Sol, interface fragile*, STENGEL P. et GELIN I. [Éditeurs], INRA Edition, 109-123.
- DIAW E.B. (1996). *Modélisation du transfert d'eau en milieux poreux non saturés : application à l'étude de la recharge des nappes souterraines en région soudano-Sahélienne*. Thèse de l'université Louis Pasteur, Institut de Mécanique des Fluides, Strasbourg, 239 p.
- DIAW EL H.B., P. ACKERER, P. BOIVIN, F. LAVAL et MAEGHT J.L. (2002). Étude expérimentale des transferts d'eau provoqués par l'irrigation sur une parcelle en moyenne vallée du fleuve Sénégal. *Rev. Sci. Eau*, 15, 721-736.
- DECKERS J., D. RAES, J. CEUPPENS, I. DE WACHTER, R. MERCKX et A. DIALLO (1996). Évolution de l'acidité dans les sols du delta du fleuve Sénégal sous influence anthropogène. *Étude Gest. sols*, 3, 151-166.
- DOORENBOS J. et W.O. PRUITT (1977). Les besoins en eau des cultures. FAO, Rome, Italie. *Bulletin FAO irrigation Drainage*, 24, 144 p.
- FAO/SEDAGRI (1969) Etude hydro-agricole du bassin du Fleuve Sénégal. Carte pédologique et géomorphologique de la vallée et du delta du Sénégal au 1/50 000. FAO, Rome, Italie.
- FAVRE, F., P. BOIVIN et M.C.S. WOPEREIS (1997). Water movement and soil swelling in a dry cracked Vertisol. *GEODERMA*, 78, 113-123.
- FEDDES R. A., P.J. KOWALIK et H. ZARADNY (1978). *Simulation of field water use and crop yield*, John Wiley & Sons (ÉDITEURS), New York, NY.
- GASCUEL-ODOUX C. et P. BOIVIN (1994). Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling - a Case-Study. *GEODERMA*, 62, 165-182.
- HAMMECKER C., A.C.D ANTONIO, J.L. MAEGHT et P. BOIVIN P. (2003) Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: evidence of air entrapment. *Eur. J. Soil Sci.*, 54, 491-503.
- HOPMANS J.W. et J.N.M. STRICKER (1989). Stochastic analysis of soil water regime in a watershed. *J. Hydrol.*, 105, 57-84.

- LE BRUSQ J.Y. et J.Y. LOYER (1983). *Évolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le delta du fleuve Sénégal*. Multigr. ORSTOM Dakar, 16 p.
- LEGAL P.Y. (1993). *Rapport annuel d'activité de 1992*. ISRA-CIRAD, Saint-Louis. Sénégal, 60 p.
- LOYER J.Y. (1989) *Les sols de la basse vallée du fleuve Sénégal*, Éditions de l'ORSTOM. Collection Études et Thèses. Paris, France. 137p.
- MICHEL P. (1973). *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, étude géomorphologique*. Mémoire Orstom, 3 tomes, Orstom (Éditeurs) Paris, France, 753 p.
- MUALEM Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 513-522.
- NDIAYE B. et D. ISABEL (1999). Geostatistical analysis of hydrogeology and agricultural land reclamation in Senegal river delta. *J. Am. Water Resour. Ass.*, 35, 265-276.
- OMVS/USAID (1990). *Rapport de synthèse hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal* (Projet 625-0958). International Science and Technology Institute, Washington, USA, Rapport Final, Volume II, 76 p.
- ORSTOM E. (1996). *Pour des systèmes irrigués autogérés et durable : façonner les institutions*. Multigr. Inter-réseaux, groupe Irrigation Observatoire des périmètres irrigués Sahéliens, GRET Paris, 35p.
- PGE (1993). Bilan d'eau et coût d'énergie de périmètres rizicoles – Delta et vallée du fleuve Sénégal, campagnes de 1991 et 1992. Publication du Projet de Gestion de l'Eau (PGE), *Bull. Tech.* 6, 106 p.
- PGE (1991). Analyse du bilan d'eau de deux cuvettes du delta du fleuve Sénégal – Campagne hivernale 1990. Publication du Projet de Gestion de l'Eau (PGE), *Bull. Tech.* 3, 69 p.
- QADIR M., R.H. QURESHI et N. AHMAD (1998). Horizontal flushing: a promising ameliorative technology for hard saline-sodic and sodic soils. *Soil Tillage*, 45, 119-131.
- RAES D., J. DECKERS et A.M. DIALLO (1995). Water requirements for salt control in rice schemes in the Senegal river Delta and Valley. *Irrig. Drain. Syst.*, 9, 129-141.
- RAES, D., B. SY et J. FEYEN (1995). Water use in rice schemes in the Senegal river Delta and Valley. *Irrig. Drain. Syst.*, 9, 117-128.
- SAED (1997). *Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal*. Ministère de l'Agriculture, SAED, Sénégal, Annuaire 1995/1996, Dakar, Sénégal, 142 p.
- SIMUNEK J., M. SEJNA et M.T. VAN GENUCHTEN (1996). The Hydrus-2D Software Package for Simulating water flow and solute transport in two dimensional variably saturated media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- SPOSITO G. et S.V. MATTIGOD (1977). Chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 323-329
- VAN ASTEN P.J.A., L. BARBIERO, M.C.S. WOPEREIS, J.L. MAEGHT et S.E.A.T.M VAN DER ZEE (2003). Actual and potential salt-related soil degradation in an irrigated rice scheme in the Sahelian zone of Mauritania. *Agric. Water Manag.*, 60, 13-32.
- VAN GENUCHTEN M.T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- VAN GENUCHTEN M.T., F.J. LEIJ et S.R. YATES (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. US Department of Agriculture, Riverside, CA, Riverside, 85 p.
- VAN LAVIEREN B. et J. VAN WETTEN (1990). *Profil de l'environnement de la vallée du Fleuve Sénégal*. Rapport commandité par la Direction Générale de la Coopération au Développement du Ministère des Affaires Etrangères des Pays-Bas, La Haie, Pays-bas, 68 p.